

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

Applicant(s): FLEURY, Marc
Serial No.: Not yet assigned
Filed: September 10, 2003
Title: METHOD FOR DETERMINING THE RESISTIVITY INDEX, AS A FUNCTION OF THE WATER SATURATION, OF CERTAIN ROCKS OF COMPLEX POROSITY
Group: Not yet assigned

LETTER CLAIMING RIGHT OF PRIORITY

Commissioner for Patents
P.O. Box 1450
Alexandria, VA 22313-1450

September 10, 2003

Sir:

Under the provisions of 35 USC 119 and 37 CFR 1.55, the applicant(s) hereby claim(s) the right of priority based on French Patent Application No.(s) 02/11.282, filed September 11, 2002.

A certified copy of said French Application is attached.

Respectfully submitted,

ANTONELLI, TERRY, STOUT & KRAUS, LLP


Donald E. Stout
Registration No. 26,422

DES/alb/nac
Attachment
(703) 312-6600





02 11 892
3

BREVET D'INVENTION

CERTIFICAT D'UTILITÉ - CERTIFICAT D'ADDITION

COPIE OFFICIELLE

Le Directeur général de l'Institut national de la propriété industrielle certifie que le document ci-annexé est la copie certifiée conforme d'une demande de titre de propriété industrielle déposée à l'Institut.

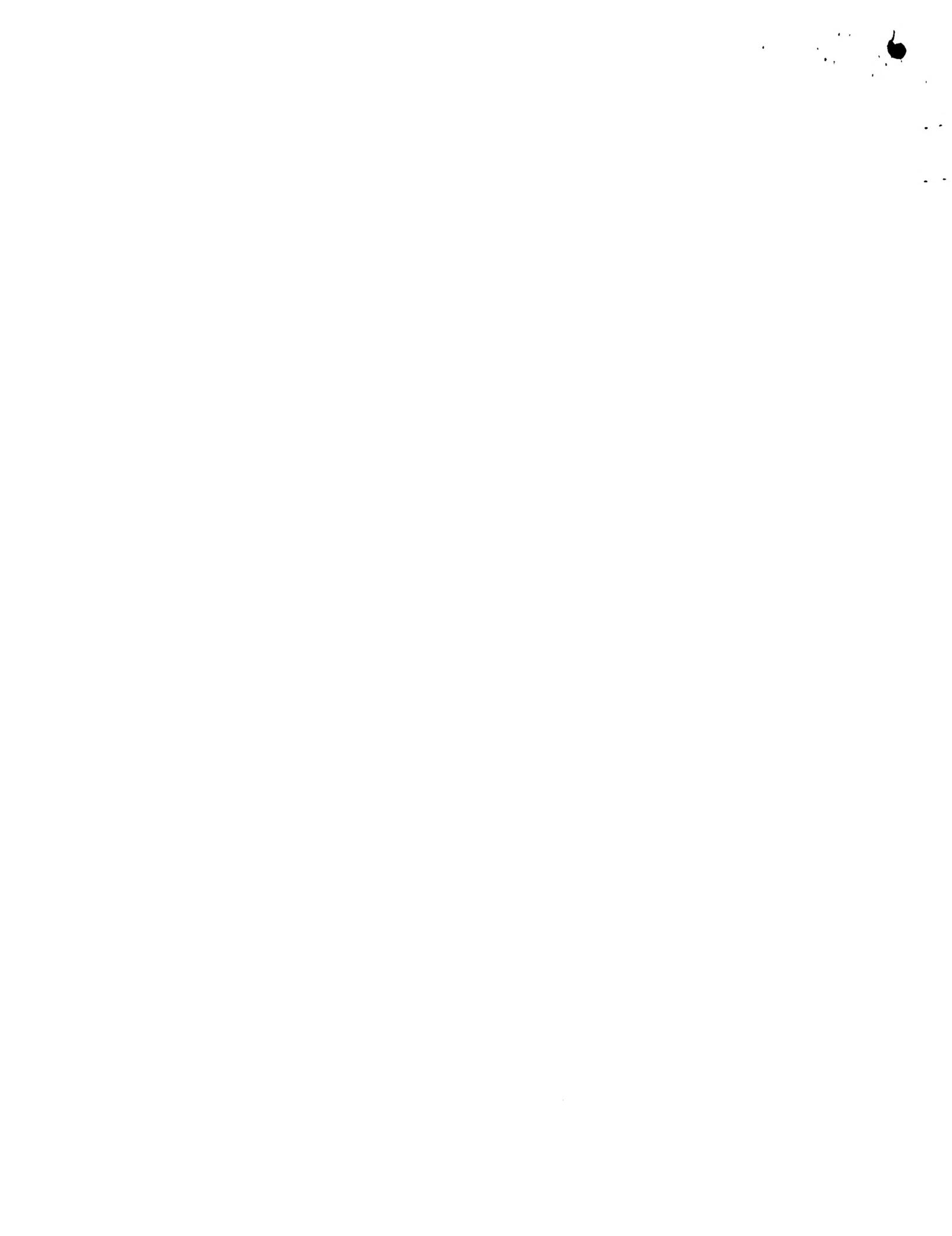
Fait à Paris, le 01 AOUT 2003

Pour le Directeur général de l'Institut
national de la propriété industrielle
Le Chef du Département des brevets

Martine PLANCHE

**INSTITUT
NATIONAL DE
LA PROPRIETE
INDUSTRIELLE**

SIEGE
26 bis, rue de Saint Petersbourg
75800 PARIS cedex 08
Téléphone : 33 (0)1 53 04 53 04
Télécopie : 33 (0)1 53 04 45 23
www.inpi.fr





26 bis, rue de Saint Pétersbourg
75800 Paris Cedex 08
Téléphone : 33 (1) 53 04 53 04 Télécopie : 33 (1) 42 94 86 54

BREVET D'INVENTION

CERTIFICAT D'UTILITÉ

Code de la propriété intellectuelle - Livre VI

cerfa
N° 11354*02

REQUÊTE EN DÉLIVRANCE

page 1/2

BR1

Cet imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire

DB 540 2 W / 010801

REMISE DES PIÈCES DATE <u>11/09/2002</u> LIEU <u>99</u> N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI DATE DE DÉPÔT ATTRIBUÉE PAR L'INPI		Réservé à l'INPI
1 NOM ET ADRESSE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE À QUI LA CORRESPONDANCE DOIT ÊTRE ADRESSÉE INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE 1 et 4 avenue de Bois Préau 92852 Rueil-Malmaison cedex		
Vos références pour ce dossier (facultatif) JC/CLN		
Confirmation d'un dépôt par télécopie <input type="checkbox"/> N° attribué par l'INPI à la télécopie		
2 NATURE DE LA DEMANDE <input checked="" type="checkbox"/> Cochez l'une des 4 cases suivantes <ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Demande de brevet <input type="checkbox"/> Demande de certificat d'utilité <input type="checkbox"/> Demande divisionnaire <input type="checkbox"/> <i>Demande de brevet initiale ou demande de certificat d'utilité initiale</i> 		
Transformation d'une demande de brevet européen <input type="checkbox"/> <i>Demande de brevet initiale</i> N° <input type="checkbox"/> Date <input type="checkbox"/>		
N° <input type="checkbox"/> Date <input type="checkbox"/>		
3 TITRE DE L'INVENTION (200 caractères ou espaces maximum) METHODE POUR DETERMINER L'INDICE DE RESISTIVITE EN FONCTION DE LA SATURATION EN EAU, DE CERTAINES ROCHES DE POROSITE COMPLEXE		
4 DÉCLARATION DE PRIORITÉ OU REQUÊTE DU BÉNÉFICE DE LA DATE DE DÉPÔT D'UNE DEMANDE ANTÉRIEURE FRANÇAISE Pays ou organisation Date <input type="checkbox"/> N° Pays ou organisation Date <input type="checkbox"/> N° Pays ou organisation Date <input type="checkbox"/> N° <input type="checkbox"/> S'il y a d'autres priorités, cochez la case et utilisez l'imprimé « Suite »		
5 DEMANDEUR (Cochez l'une des 2 cases) <input checked="" type="checkbox"/> Personne morale <input type="checkbox"/> Personne physique		
Nom ou dénomination sociale <input type="checkbox"/> INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE		
Prénoms <input type="checkbox"/>		
Forme juridique <input type="checkbox"/> Organisme Professionnel		
N° SIREN <input type="checkbox"/>		
Code APE-NAF <input type="checkbox"/>		
Domicile ou siège	Rue	1 et 4 avenue de Bois Préau
	Code postal et ville	<u>921852</u> Rueil-Malmaison cedex
	Pays	France
Nationalité <input type="checkbox"/> Française		
N° de téléphone (facultatif)		01 47 52 60 00
		N° de télécopie (facultatif) 01 47 52 70 03
Adresse électronique (facultatif)		<input type="checkbox"/> S'il y a plus d'un demandeur, cochez la case et utilisez l'imprimé « Suite »

Remplir impérativement la 2^{me} page

**BREVET D'INVENTION
CERTIFICAT D'UTILITÉ**

REQUÊTE EN DÉLIVRANCE
page 2/2

BR2

REMISE DES PIÈCES		Réservé à l'INPI
DATE	11/09/2002	
LIEU	93	
N° D'ENREGISTREMENT	0211282	
NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI		

DB 540 C W / 010801

6 MANDATAIRE (s'il y a lieu)		JC/CLN
Nom		ELMALEH
Prénom		Alfred
Cabinet ou Société		INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE
N° de pouvoir permanent et/ou de lien contractuel		
Adresse	Rue	1 et 4 avenue de Bois Préau
	Code postal et ville	9218521 Rueil-Malmaison cedex
	Pays	France
N° de téléphone (facultatif)		01 47 52 60 00
N° de télécopie (facultatif)		01 47 52 70 03
Adresse électronique (facultatif)		
7 INVENTEUR (S)		Les inventeurs sont nécessairement des personnes physiques
Les demandeurs et les inventeurs sont les mêmes personnes		<input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non : Dans ce cas remplir le formulaire de Désignation d'inventeur(s)
8 RAPPORT DE RECHERCHE		Uniquement pour une demande de brevet (y compris division et transformation)
Établissement immédiat ou établissement différé		<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Paiement échelonné de la redevance (en deux versements)		Uniquement pour les personnes physiques effectuant elles-mêmes leur propre dépôt <input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non
9 RÉDUCTION DU TAUX DES REDEVANCES		Uniquement pour les personnes physiques <input type="checkbox"/> Requise pour la première fois pour cette invention (joindre un avis de non-imposition) <input type="checkbox"/> Obtenue antérieurement à ce dépôt pour cette invention (joindre une copie de la décision d'admission à l'assistance gratuite ou indiquer sa référence) : AG <input type="text"/>
Si vous avez utilisé l'imprimé «Suite», indiquez le nombre de pages jointes		
10 SIGNATURE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE (Nom et qualité du signataire) Alfred ELMALEH, Chef du Département Brevets		
		VISA DE LA PRÉFECTURE OU DE L'INPI  Mme BLANCANEAUX

La présente invention concerne une méthode pour déterminer l'indice de résistivité RI en fonction de la saturation en eau, de certaines roches de porosité complexe.

La méthode selon l'invention trouve des applications notamment dans le domaine 5 de l'exploitation de gisements d'hydrocarbures.

L'évaluation des réservoirs carbonatés est une tâche particulièrement difficile pour les pétrophysiciens, et l'on manque toujours de connaissances précises concernant les propriétés de transport au sein de ces milieux poreux. Par rapport aux roches siliclastiques, les carbonates peuvent être plus simples sur le plan minéralogique, mais ils sont 10 incomparablement plus complexes en termes de structure poreuse et de propriétés de surface. L'origine largement biologique des sédiments, alliée à différents processus diagénétiques, donne lieu à des structures poreuses complexes qui peuvent être extrêmement différentes d'un réservoir à l'autre. Pour de nombreux systèmes carbonatés, les étalonnages-de données de résistivité réalisés en laboratoire sont en contradiction avec 15 les observations faites sur le terrain (production anhydre, pression capillaire) et avec les mesures directes de saturation en eau effectuées sur des carottes préservées.

Etat de la technique

L'état de la technique est défini notamment par les publications suivantes :

- Bouvier L. et al, Reconciliation of Log and Laboratory Derived Irreducible Water Saturation in a Double Porosity reservoir, Advances in Core Evaluation, edited by 20 Worthington and Longeron, Gordon and Breach Science Publishers ;
- Dixon J.R. et al (1990), The Effect of Bimodal pore Size Distribution on Electrical Properties of some Middle Eastern Limestone, Soc. Petr. Eng. 20601, 7th SPE Middle Eastern Oil Show, Bahrain, pp.743-750 ;
- 25 - Fleury M. (1998), "FRIM : a Fast Resistivity Index Measurement Method", Proceedings of the International Symposium of the Society of the Core Analysts, Den Hague ;

- Fleury M. et al (2000) "Frequency Effect on Resistivity Index Curves Using a New Method", Proceedings of the 41st Annual SPWLA Symposium, Dallas ;
- Moore C.H., (2001) "Carbonate reservoirs, Porosity Evaluation and Diagenesis in a Sequence Stratigraphic Framework", Developments in Sedimentology 55, Elsevier Editions ;
- Petricola M.J.C. et al, (1995), "Effect of Microporosity in Carbonates: Introduction of a Versatile Saturation Equation", Soc. Petr. Eng. 29841, SPE Middle Eastern Oil Show, Bahrain, pp.607-615 ;
- Sen P.N. et al (1997), "Resistivity of Partially Saturated Rocks with Microporosity", Geophysics, Vol.62, N°2, pp. 415-425.

La compréhension et la prédiction de l'effet de la structure du réseau poreux de la mouillabilité et des propriétés électriques de roches carbonatées, constituent un véritable défi scientifique, tant sur le plan théorique qu'expérimental. La correcte évaluation de ces paramètres a en effet une incidence majeure sur l'estimation du pétrole en place, notamment pour les gisements pétroliers géants du Moyen-Orient, car l'écart par rapport aux valeurs standard des exposants d'Archie m et n par rapport à la valeur 2 est si important que l'estimation de la saturation en eau peut varier de plus de 20 %.

Différentes observations expérimentales ont montré l'existence de populations de pores distinctes: micropores, macropores et mésopores, présentant des degrés de coexistence divers. En général, la courbe d'indice de résistivité $RI(Sw)=Rt(Sw)/Ro$, où Rt est la résistivité de la roche à une saturation en eau Sw , et Ro la résistivité pour $Sw=1$, ne peut pas être décrite par une loi de puissance (seconde loi d'Archie $RI=Sw^{-n}$) et, cad n est fonction de la saturation elle-même. La microporosité peut agir comme un chemin parallèle pour le courant, ce qui entraîne une diminution des valeurs de n et, de ce fait, une insensibilité graduelle de la résistivité à la saturation, comme cela a été observé sur des sables argileux. La microporosité peut être aussi la cause des faibles valeurs de n mesurées (typiquement 1,45). On a aussi observé que n peut augmenter considérablement dans certaines conditions, et qu'il existerait un lien entre la courbe $RI(Sw)$ et la courbe de pression capillaire. L'augmentation des valeurs de n est également un effet connu de la mouillabilité, qui tend à favoriser la discontinuité de la phase aqueuse et ainsi à augmenter la résistivité par rapport à la mouillabilité à l'eau. L'effet de la mouillabilité peut entraîner

soit une augmentation soudaine de n , soit une valeur n élevée sans discontinuité. Une confusion est de ce fait possible.

Les courbes expérimentales $RI(Sw)$ qui ont été établies à la suite de divers travaux antérieurs déjà cités et de nos propres observations, peuvent présenter (Fig.1) quatre 5 formes distinctes qui ne satisfont pas toujours aux lois d'Archie :

- type I : peut être typique de carbonates provenant de la formation Thamama,
- type II : se redressant à une saturation intermédiaire et s'aplatissant à faible saturation (la présente étude),
- type III : pente unique à faible saturation, extrapolation à $Sw=1$ au-dessus de $Ir=1$, et
- 10 - type IV : typique de systèmes mouillables à l'huile, valeurs élevées de n pouvant augmenter encore à faible saturation. Ceci est également valable pour les clastes.

On voit donc que lorsqu'on se trouve en présence de roches à la porosité complexe qui ne satisfont pas aux lois d'Archie, un grand nombre de mesures coûteuses est nécessaire pour tenir compte de la variabilité de la structure poreuse.

15 **La méthode selon l'invention**

La méthode selon l'invention a pour objet de déterminer les variations de l'indice de résistivité (RI) d'une famille d'échantillons de roche à structure poreuse complexe en fonction de la saturation en eau (Sw), en présence d'un fluide non conducteur. Elle comporte les étapes suivantes :

- 20 - pour chaque échantillon de la famille comprenant au moins un premier et un deuxième réseaux de pores, on détermine la fraction volumique occupée par chaque réseau de pores, par application aux différents échantillons d'une technique de relaxométrie de type RMN ;
- pour chaque échantillon de la famille, on mesure par injection de mercure la 25 distribution des seuils de pores dans les différents réseaux de pores ;

- on détermine expérimentalement sur un échantillon au moins de la famille servant de référence, les valeurs de coefficients reliant la variation de sa résistivité électrique en fonction de sa saturation en eau ; et
- on détermine l'indice de résistivité (RI) de tous les échantillons de la famille en se basant sur la variation de paramètres décrivant l'agencement du réseau poreux et en utilisant les valeurs des coefficients mesurés sur l'échantillon de référence.

5 Suivant un premier mode de mise en œuvre convenant pour les échantillons comportant deux réseaux de pores, on détermine à partir de l'échantillon de référence, les 10 valeurs des coefficients reliant la conductivité totale de l'échantillon aux conductivité des premier et deuxième réseaux de pores et aux saturations respectives en eau des deux réseaux, l'indice de résistivité étant calculé à partir des fractions volumiques respectives des deux réseaux de pores et de la valeur de la saturation moyenne à partir de laquelle le réseau ayant les plus petits pores, est envahi par le fluide non conducteur.

15 Suivant un deuxième mode de mise en œuvre convenant pour les échantillons comportant un troisième réseau de pores, on détermine à partir de l'échantillon de référence, les 20 valeurs des coefficients reliant la conductivité totale de l'échantillon aux conductivité des premier et deuxième réseaux de pores et aux saturations respectives en eau des deux premiers réseaux, l'indice de résistivité étant calculé à partir des fractions volumiques respectives des trois réseaux de pores, de la valeur de la saturation moyenne à partir de laquelle le réseau parmi les deux premiers réseaux de pores qui a les plus petits pores est envahi par le fluide non conducteur, et de la valeur de la saturation moyenne à partir de laquelle le réseau ayant les plus grands pores parmi les deux premiers réseaux de pores, est envahi par le fluide non conducteur.

25 Les variations de l'indice de résistivité obtenues par application de la méthode, s'ajustent au mieux aux courbes expérimentales dont les exemples sont illustrés à la Fig.1. La méthode s'appuie sur une technique expérimentale puissante permettant de mesurer une courbe d'indice de résistivité continue au lieu de la technique classique qui décrit la courbe RI seulement par un nombre limité de points à l'équilibre capillaire.

Présentation succincte des figures

Les caractéristiques et avantages de la méthode et du dispositif selon l'invention, apparaîtront plus clairement à la lecture de la description ci-après en se référant aux dessins annexés où :

- 5 - la figure 1 montre une représentation schématique en coordonnées logarithmiques de différents types de courbes RI en fonction de la saturation en eau S_w observées expérimentalement; les courbes I à III sont dus à la structure poreuse, la courbe IV est typique des effets de la mouillabilité et n'est pas spécifique aux carbonates ;
- 10 - la figure 2 montre une distribution des tailles de pores de trois carbonates étudiés : (carbonate de gisement, calcaire d'Estailade et calcaire de Brauvillier) obtenue par RMN ; les chiffres indiquent la fraction volumique de pore à gauche du segment vertical ;
- 15 - les figures 3a, 3b montrent la sensibilité du modèle à deux réseaux de pores (DPC) à la saturation S_c à laquelle les micropores sont envahis par l'huile (3a) et à α , rapport de conductivité initiale des deux populations de pores (3b) ;
- 20 - les figures 4a, 4b montrent l'application du modèle DPC à l'échantillon RC à la température ambiante (4a) et dans les conditions de gisement avec de l'huile morte (4b); la courbe expérimentale est en traits fins et le modèle en trait gras; les paramètres n_1 , n_2 et α sont ajustés, f_1 et S_c sont mesurés ;
- 25 - la figure 5 montre un scénario d'invasion dans le modèle à trois réseaux de pores (TPC) ;
- la figure 6 montre un agencement électrique modélisant les trois réseaux dans le modèle TPC ;
- la figure 7 montre une courbe RI mesurée (trait fin) et modèle (trait gras) pour l'échantillon EL (calcaire d'Estailade) ;
- 25 - la figure 8 montre une courbe RI mesurée (trait fin) et modèle (trait gras) pour l'échantillon BL (calcaire de Brauvillier) ; et

- la figure 9 montre une séquence de calibrage simplifié pour les diagraphies de résistivité ; pour les roches de type non-Archie, $Sw(RI)$ est nécessaire ; les données de laboratoire fournissent généralement la relation $RI(Sw)$.

Description détaillée

5 On dispose d'un certain nombre d'échantillons d'une même famille et l'on veut calculer l'indice de résistivité de chacun d'eux. La méthode que l'on va décrire permet d'obtenir ces indices, essentiellement à partir :

- de mesures expérimentales effectuées sur chaque échantillon de la famille, donnant le nombre de réseaux de pores de tailles différentes et la fraction volumique occupée par 10 chaque réseau de pores ainsi que la distribution des seuils de pores pour chacun d'eux ; et
- d'une mesure expérimentale faite sur un seul échantillon de la famille, servant de référence, de la variation de sa résistivité électrique en fonction de sa saturation en eau (Sw).

15 Nomenclature

C_{to} = conductivité totale à $Sw=1$

C_i = conductivité de la i -ième population à $Sw_i=1$

f_i = fraction volumique de pores RMN de la i -ième population, $i=1,2,3$

RI = indice de résistivité, $Rt/RoSw$ = saturation moyenne en eau

20 Sw_i = saturation en eau de la i -ième population de pores

Sc = saturation moyenne à laquelle les micropores sont envahis

Sm = saturation moyenne à laquelle les macropores sont envahis

$\alpha_{1,2}$ = rapport de conductivité C_1/C_2 et C_1/C_3 respectivement.

Données expérimentales sur échantillons

Mesures de temps de relaxation RMN

Dans un premier temps, on détermine par une méthode de relaxométrie de type RMN bien connue des spécialistes, les différents réseaux de pores à l'intérieur des échantillons de roche et la fraction volumétrique occupée par chaque réseau. Un exemple 5 d'une telle méthode de relaxométrie d RMN est décrit par exemple dans la demande de brevet français EN 02/... du demandeur.

Nous présentons les mesures réalisées sur trois échantillons de carbonate sélectionnés. En leur appliquant une méthode de relaxométrie de type RMN bien connue 10 des spécialistes, on peut voir que tous les échantillons se caractérisent par une distribution des tailles de pores double ou triple. Le premier est un échantillon de carbonate de gisement provenant du Moyen-Orient classé parmi les "packstones". Il a été nettoyé au moyen de différents solvants à température élevée avant de procéder aux mesures. A conditions ambiantes, l'expérience a été effectuée avec de l'huile raffinée et de la saumure 15 de réservoir synthétique. L'expérience réalisée dans des conditions de gisement a été conduite avec de l'huile de gisement dégazée morte filtrée à la pression de réservoir. Après nettoyage, la mouillabilité de l'échantillon se caractérise par une mouillabilité modérée à l'eau et, après vieillissement, par une forte mouillabilité à l'huile. Les deux autres échantillons sont des carbonates d'affleurement (mouillables à l'eau). La porosité du 20 calcaire de Brauvillier (BL) est essentiellement intergranulaire et due au cortex de l'oolite. La porosité du calcaire d'Estailade est à la fois inter et intragranulaire. Les populations de pores sont séparées par un facteur 10 au moins.

Mesures d'indice de résistivité

On mesure ensuite l'indice de résistivité des échantillons. On peut utiliser 25 avantageusement la méthode de mesure rapide de l'indice de résistivité (dite FRIM) telle que décrite dans les brevets EP 974 839 du demandeur.

Suivant cette méthode, on réalise un déplacement forcé huile-eau sur une petite carotte de 2,5 cm de long et 4 cm de diamètre par exemple. Ce déplacement est très proche 30 d'un procédé de déplacement à paroi semiperméable, excepté que l'équilibre capillaire n'est pas nécessaire. A conditions ambiantes, seuls deux ou trois paliers de pression sont

utilisés. Aux conditions de gisement, lors de l'utilisation d'huile morte ou brute, on fait durer chaque palier de pression le temps nécessaire pour obtenir la stabilisation de la mouillabilité à une saturation donnée. Le drainage s'effectue ainsi en approximativement deux à trois semaines, ce qui correspond de manière typique à la cinétique des processus chimiques liés au vieillissement. La simplicité de cette méthode tient au fait qu'il suffit d'enregistrer et de reporter en temps réel la saturation et la résistance moyennes pour obtenir une courbe d'indice de résistivité continue exempte de tout artefact. Le point-clé réside dans le fait que la géométrie radiale des électrodes permet d'examiner la totalité du volume de l'échantillon et de compenser le profil de saturation non-uniforme qui apparaît en l'absence d'équilibre capillaire.

À conditions ambiantes, nous avons utilisés la cellule à électrodes radiales décrite par exemple dans le brevet EP-A-974 839 déjà cité. Les mesures d'impédance complexe ont été effectuées à une fréquence fixe de 1 kHz et la partie réelle a été extraite pour calculer l'indice de résistivité. La pression capillaire imposée la plus élevée était de 12 bars (pour une tension interfaciale $\gamma=35$ mN/m ; aux conditions de gisement, avec de l'huile brute, la pression capillaire maximale a été réduite proportionnellement à la tension interfaciale).

Modèles de conductivité

Modèle de conductivité de porosité double (DPC)

L'objectif est d'expliquer le fléchissement des courbes RI à faible saturation (type I, figure 1). Le modèle de double porosité considéré ici est pour l'essentiel très proche de ceux proposés pour les sables argileux, où les argiles présentes à la surface des pores constituent un chemin parallèle pour le courant. Pour les carbonates, nous admettons l'existence de deux réseaux de pores présentant des conductivités électriques parallèles. Les deux principaux ingrédients dans notre modèle sont la description de l'invasion des réseaux de pores en cours de drainage, et la description de l'agencement électrique des deux différentes populations de pores.

Le premier réseau 1 (macropores par exemple) représente la majeure partie du volume de pores, tandis que le deuxième réseau 2 (micropores) n'en représente qu'une petite fraction, qui n'est pas nécessairement supérieure aux seuils de percolation. Dans un

premier temps, nous considérons la saturation de chaque réseau, Sw_1 et Sw_2 , qui sont reliées à la saturation moyenne mesurée Sw selon :

$$Sw = f_1 Sw_1 + f_2 Sw_2 \text{ où } f_1 + f_2 = 1 \quad (1).$$

f₁ et f₂ représentent la fraction volumique de pore de chaque population. Ces 5 fractions ont été évaluées au moyen de la relaxométrie RMN. Dans un deuxième temps, on admet que les réseaux sont envahis par de l'huile à différentes pressions capillaires ; l'huile accède aux pores de petite taille à une pression supérieure à celle observée pour les pores de grande taille. A partir de la courbe de pression capillaire établie précédemment, cette 10 pression correspond à une saturation moyenne Sc qui peut être déduite des courbes obtenues par injection de mercure (indiquant la distribution des seuils de pores). Sw_1 peut être exprimé en fonction de Sw à saturation Sw élevée :

$$Sw_1 = \frac{Sw + f_1 - 1}{f_1}, Sw_2 = 1 \text{ pour } Sw \geq Sc \quad (2)$$

En dessous de Sc , les relations $Sw_1=f(Sw)$ et $Sw_2=f(Sw)$ nécessitent d'autres hypothèses. On admettra (i) une relation linéaire et (ii) que $Sw_1 \rightarrow 0$, $Sw_2 \rightarrow 0$ quand $Sw \rightarrow 0$.

On en déduit que :

$$Sw_1 = \frac{f_1 + Sc - 1}{f_1 Sc} Sw, \\ Sw_2 = \frac{Sw}{Sc} \text{ pour } Sw \leq Sc \quad (3)$$

15 Nous considérons maintenant la conductivité de chaque réseau. Dans le cas d'une saturation initiale en saumure, la conductivité totale Ct_0 pour les deux réseaux en parallèle sera :

$$Ct_0 = C_1 + C_2 = C_1 (1 + \alpha) \text{ où } C_2 = \alpha C_1 \quad (4).$$

Le paramètre α est le rapport de conductivité des deux réseaux saturés à 100 %. A 20 partir de la première loi d'Archie, on suppose que C_1 et C_2 sont reliés à la fraction volumique de pore de chaque population et que, de ce fait, α est de l'ordre du rapport f_2/f_1 . Lorsque les deux réseaux sont envahis par l'huile, on admet que chaque conductivité est

liée à la saturation par une loi de puissance (comme dans la seconde loi d'Archie). La conductivité totale dans les deux domaines de saturation est la suivante :

$$C_t = S_{w_1}^{n_1} C_1 + C_2 \text{ pour } S_w \geq S_c \quad (5)$$

$$C_t = S_{w_1}^{n_1} C_1 + S_{w_2}^{n_2} C_2 \text{ pour } S_w \leq S_c \quad (6).$$

5 Au moyen des équations 4, 5 et 6, on trouve l'indice de résistivité RI suivant :

$$RI = \frac{C_t}{C_t} = S_{w_1}^{-n_1} \frac{1 + \alpha}{1 + \alpha S_{w_1}^{-n_1}} \text{ pour } S_w \geq S_c \quad (7)$$

$$RI = S_{w_1}^{-n_1} \frac{1 + \alpha}{1 + \alpha S_{w_1}^{-n_1} / S_{w_2}^{-n_2}} \text{ pour } S_w \leq S_c \quad (8)$$

Lorsqu'une population de pores domine (le réseau 1 dans le cas présent), les fonctions RI sont régies par les propriétés de résistivité (n_1) de cette population. Les équations 7 et 8 sont essentiellement similaires aux formules utilisées pour les sables argileux, excepté que nous introduisons un second exposant n_2 qui caractérise le second réseau.

10 Dans le modèle DPC, il y a au total 4 paramètres n_1 , n_2 , α et S_c . Pour une courbe expérimentale donnée, S_c est mesuré séparément lors d'une expérience d'injection de mercure, alors que les autres paramètres sont ajustés. On observe toutefois un intervalle de variation de α autour de f_2/f_1 pour lequel il existe une explication physique. A saturation S_w élevée, la pente à l'échelle bilogarithmique de $RI(S_w)$ est $-n_1$, et à faible saturation, la pente est $-n_2$. Dans une certaine mesure, S_c et α se compensent l'un l'autre (figure 3), mais α est le paramètre le plus sensible qui contrôle la valeur finale de RI. On notera que le cas $S_c=0,05$ présenté sur la figure 3 correspond à une situation où le deuxième réseau n'est pas envahi par l'huile, ce qui donne une asymptote horizontale.

15 Les paramètres du modèle ont été ajustés en vue de correspondre à la courbe expérimentale RI mesurée sur l'échantillon RC. La valeur de $S_c=0,4$ a été déduite du coude de la courbe de pression capillaire obtenue par injection de mercure et la fraction volumique $f_1=0,88$ de macropores (réseau 1) a été déduite par RMN (figure 2). Malgré la faible perméabilité de l'échantillon, la saturation la plus faible obtenue est très basse (4 %), 20 ce qui permet une bonne détermination des paramètres du modèle aux conditions ambiantes. La pente initiale de la courbe RI est $n_1=1,71$; elle caractérise le réseau 1. Le

réseau 2 est très peu sensible à la saturation ($n_2=0,25$) et ne se comporte pas comme un réseau standard. Toutefois, le rapport de conductivité initiale $\alpha=0,054$ du réseau 1 à 2 est de l'ordre de grandeur de $f_2/f_1=0,136$. Aux conditions de gisement (conditions de mouillabilité à l'huile), on observe une forte augmentation de n_1 , mais la courbe RI n'est 5 toujours pas linéaire à l'échelle bilogarithmique. Les caractéristiques $n_2=0,78$ et $\alpha=0,11$ du deuxième réseau sont aussi légèrement modifiées, mais la précision sur ces paramètres est plus faible qu'avec les conditions ambiantes car la saturation atteinte (à la même pression capillaire) est très supérieure et proche de S_c .

Formule approchée dans le cas du modèle DPC

10 Nous proposons une formule approchée réduisant les relations 7 et 8 à une formule unique, qui est valide pour les courbes de type I. Nous notons d'abord que :

$$S_{w_2}^{n_2} S_{w_1}^{-n_1} \approx S_c^{-n_2} S_w^{n_2-n_1} \approx S_w^{n_2-n_1}$$

$$\text{avec } S_{w_1} \equiv S_w \text{ et } S_c^{-n_2} \approx 1 \quad (15)$$

ce qui donne $f_2 \ll f_1$. Comme $n_2 \ll n_1$, les équations 7 et 8 peuvent être approchées par :

$$RI = S_w^{-n_1} \frac{1+C}{1+CS_w^{n_2-n_1}} \quad (16).$$

15 Comme le montre la figure 10, l'utilisation des 3 paramètres n_1 , n_2 et C suffit pour décrire avec précision les données au moyen de l'équation 16. Ici, la signification de C est approximativement la même que α et peut dépendre de la température. La formulation donnée dans l'équation 16 peut être utilisée pour décrire des expériences standard réalisées à l'équilibre capillaire pour lesquelles on ne dispose que d'un nombre limité de points.

20 *Modèle de conductivité de porosité triple (TPC)*

L'objectif est d'expliquer le redressement des courbes RI à saturation intermédiaire ou élevée, et leur inflexion à faible saturation à l'échelle bilogarithmique (types II et III, figure 1). Nous nous servons ici de l'idée générale selon laquelle les carbonates complexes peuvent avoir trois populations de pores appelées, dans un souci de simplification, micro, 25 macro et mésopores (3, 2 et 1 respectivement). Comme dans le modèle de porosité double, on considère la saturation des 3 populations :

$$Sw = f_1 Sw_1 + f_2 Sw_2 + f_3 Sw_3 \quad \text{où} \quad f_1 + f_2 + f_3 = 1 \quad (9)$$

Là encore, on admet que l'invasion de ces populations par l'huile au cours du drainage est séquentielle. Si le réseau 1 est envahi le premier, on définit une saturation moyenne Sm à laquelle le réseau 2 est envahi :

$$Sw_1 = \frac{Sw - f_2 - f_3}{f_1},$$

$$Sw_2 = 1 \quad Sw_3 = 1 \quad \text{pour} \quad Sw \geq Sm \quad (10)$$

En dessous de Sm , il est possible d'imaginer de nombreux scénarios. En général, on admet des relations linéaires pour les fonctions $Sw_1(Sw)$ et $Sw_2(Sw)$. Selon un scénario possible, on admettra que $Sw_1 \rightarrow 0$, $Sw_2 \rightarrow 0$ lorsque $Sw \rightarrow Sc$. Sc est la saturation à laquelle la microporosité est envahie. Il s'ensuit que :

$$Sw_1 = \frac{Sw - f_2 Sw_2 - f_3}{f_1}, \quad Sw_2 = \frac{Sw - Sc}{Sm - Sc},$$

$$Sw_3 = 1 \quad \text{pour} \quad Sc \leq Sw \leq Sm \quad (11)$$

Ce scénario d'invasion est résumé sur la figure 5. Typiquement, on pense à une situation où $f_3 \ll f_1$ et $f_1 \approx f_2$, et la microporosité (réseau 3) est envahie à une pression beaucoup trop élevée pour pouvoir être observée au cours de l'expérience.

Considérons maintenant la conductivité de ces populations. On admet que les réseaux 1 et 2 sont en série, tandis que le réseau 3 est en parallèle comme le montre la figure 6. La disposition en série peut sembler en contradiction avec une invasion séquentielle par l'huile (qui est un mécanisme essentiellement parallèle), mais une telle situation est possible. A $Sw=1$, la conductivité Ct_0 du système représenté sur la figure 6 est la suivante :

$$Ct_0 = (C_1^{-1} + C_2^{-1})^{-1} + C_3 = C_1 [(1 + \alpha_1^{-1})^{-1} + \alpha_2]$$

$$\text{où } C_2 = \alpha_1 C_1, \quad C_3 = \alpha_2 C_1 \quad (12).$$

Dans les deux domaines de saturation, on obtient :

$$Ct = C_1 [(Sw_1^{-n1} + \alpha_1^{-1})^{-1} + \alpha_2] \quad \text{pour} \quad Sw \geq Sm \quad (13)$$

$$Ct = C_1 [Sw_1^{-n1} + Sw_2^{-n2} \alpha_1^{-1} + \alpha_2] \quad \text{pour} \quad Sc \leq Sw \leq Sm \quad (14).$$

L'indice de résistivité peut être calculé à partir des équations 12 à 14. Pour les valeurs mesurées de f_1 , f_2 et f_3 , il convient d'ajuster n_1 , n_2 , α_1 et α_2 aux données expérimentales. Tout comme dans le modèle DPC, on s'attend à trouver α_1 de l'ordre de f_2/f_1 et α_2 de l'ordre de f_3/f_1 .

5 Ce modèle a été testé avec des courbes d'indice de résistivité mesurées sur des échantillons EL et BL. Sur l'échantillon EL (figure 7), le redressement de la courbe à saturation élevée est reproduit qualitativement à saturation élevée et l'aplatissement à faible saturation est bien reproduit. On observe une discontinuité à Sm (déduite du coude de la courbe de pression capillaire obtenue par injection de mercure) en raison d'une
10 modification soudaine de la relation $Sw_1(Sw)$ (telle que celle montrée sur la figure 5). Après ajustage, les deux populations de pores dominantes présentent des caractéristiques similaires ($n_1=n_2=1,5$). La troisième population, qui se comporte comme un circuit parallèle, n'est pas envahie par l'huile et elle est seulement caractérisée par le rapport de conductivité α_2 . Sur l'échantillon BL (figure 8), la courbe RI peut être expliquée par un
15 mécanisme similaire de résistance en série, mais avec une valeur Sm très élevée. Nous observons enfin que les deux réseaux possèdent des valeurs n très différentes et que le réseau 2 est beaucoup moins conducteur que le réseau 1 ($\alpha_1=7,1$).

REVENDICATIONS

1) Méthode pour déterminer les variations de l'indice de résistivité (RI) d'une famille d'échantillons de roche à structure poreuse complexe en fonction de la saturation en eau (Sw), en présence d'un fluide non conducteur, comportant les étapes suivantes :

5 - pour chaque échantillon de la famille comprenant au moins un premier et un deuxième réseau de pores, on détermine la fraction volumique (f_1, f_2) occupée par chaque réseau de pores, par application aux différents échantillons d'une technique de relaxométrie de type RMN ;

10 - pour chaque échantillon de la famille, on mesure par injection de mercure la distribution des seuils de pores donnant accès aux différents réseaux de pores ;

- on détermine expérimentalement sur un échantillon au moins de la famille servant de référence, les valeurs de coefficients (n_1, n_2) reliant la variation de sa résistivité électrique en fonction de sa saturation en eau (Sw) ; et

15 - on détermine l'indice de résistivité (RI) de tous les échantillons de la famille en se basant sur la variation de paramètres décrivant l'agencement du réseau poreux (f_1, f_2, Sc, Sm) et en utilisant les valeurs des dits coefficients mesurés sur l'échantillon de référence.

2) Méthode selon la revendication 1, caractérisée en ce que l'on détermine à partir de l'échantillon de référence, les valeurs des coefficients (n_1, n_2) reliant la conductivité totale (Ct) de l'échantillon aux conductivité (C_1, C_2) des premier et deuxième réseaux de pores et aux saturations respectives en eau (SW_1, SW_2) des deux réseaux, l'indice de résistivité étant calculé à partir des fractions volumiques respectives (f_1, f_2) des deux réseaux de pores et de la valeur de la saturation moyenne (Sc) à partir de laquelle le réseau ayant les pores les plus petits, est envahi par le fluide non conducteur.

25 3) Méthode selon la revendication 1, caractérisée en ce que pour un échantillon comprenant un troisième réseau de pores, on détermine à partir de l'échantillon de référence, les valeurs des coefficients (n_1, n_2) reliant la conductivité totale (Ct) de l'échantillon aux conductivité (C_1, C_2) des premier et deuxième réseaux de pores et aux saturations respectives en eau (SW_1, SW_2) des deux premiers réseaux, l'indice de résistivité étant calculé à partir des fractions volumiques respectives (f_1, f_2, f_3) des trois réseaux de

pores, de la valeur de la saturation moyenne (S_c) à partir de laquelle le réseau qui a les plus petits pores parmi les deux premiers réseaux de pores, est envahi par le fluide non conducteur, et de la valeur (S_m) à partir de laquelle le réseau ayant les plus grands pores, parmi les deux premiers réseaux de pores, est envahi par le fluide non conducteur.

1/4

FIG.1

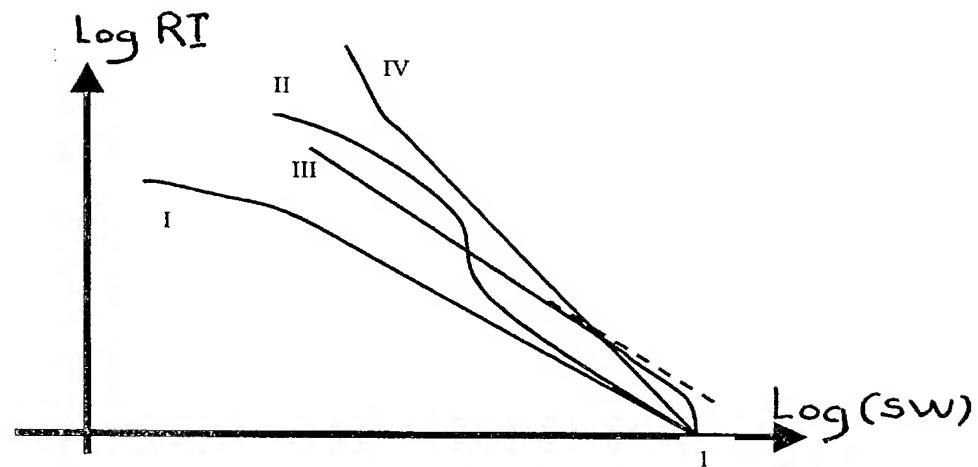


FIG.2

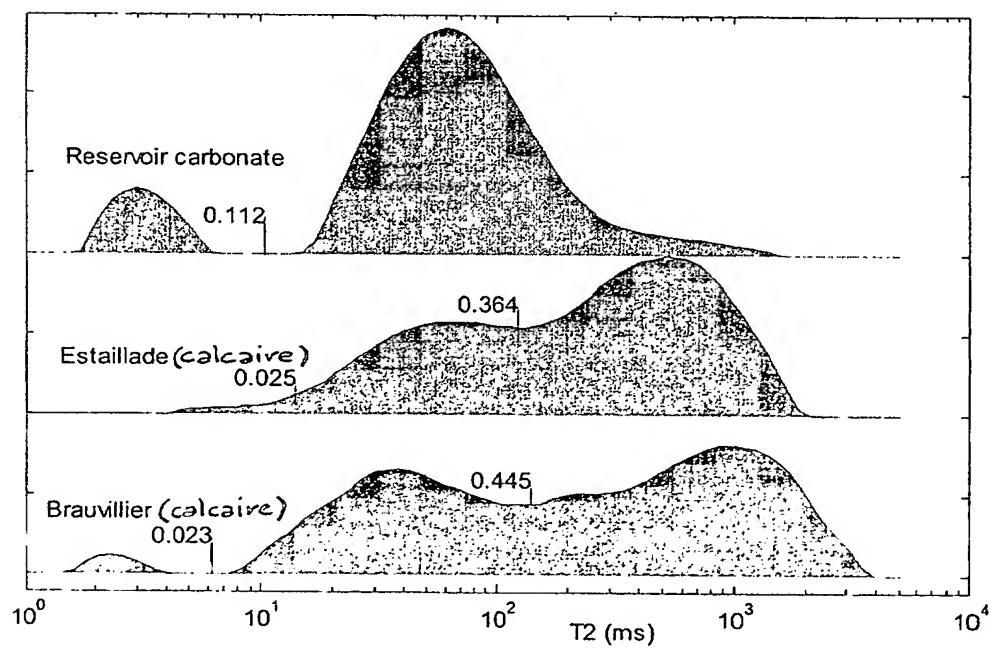


FIG.3A

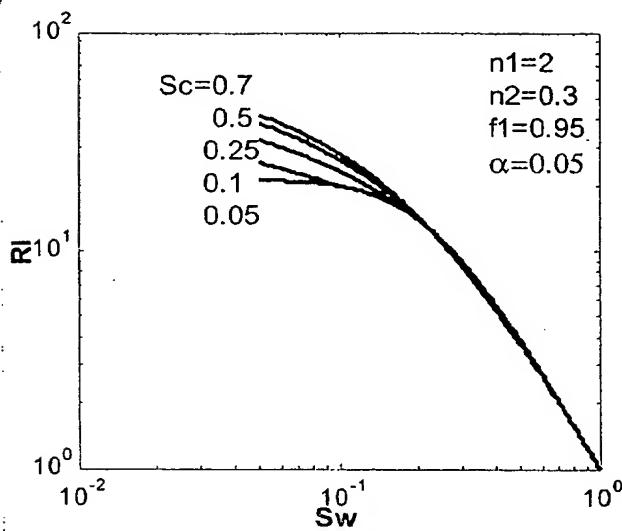


FIG.3B

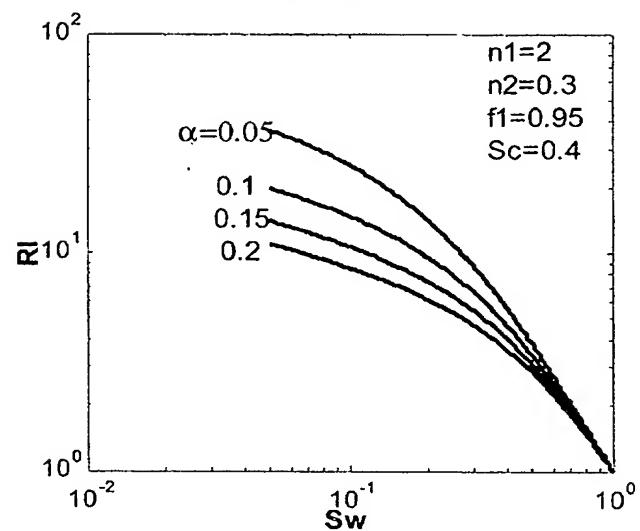


FIG.4A

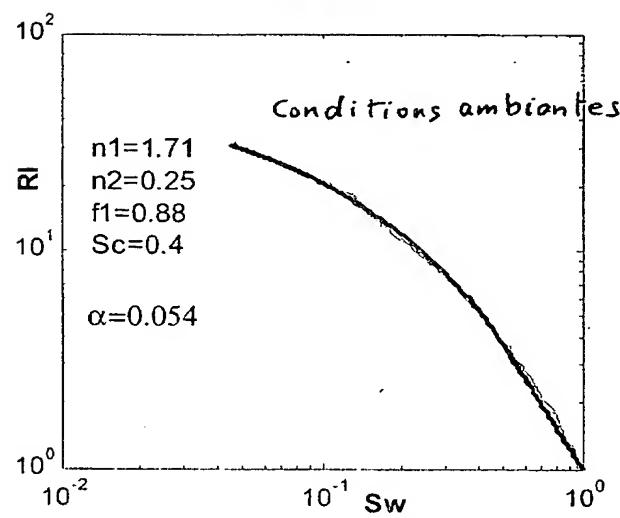
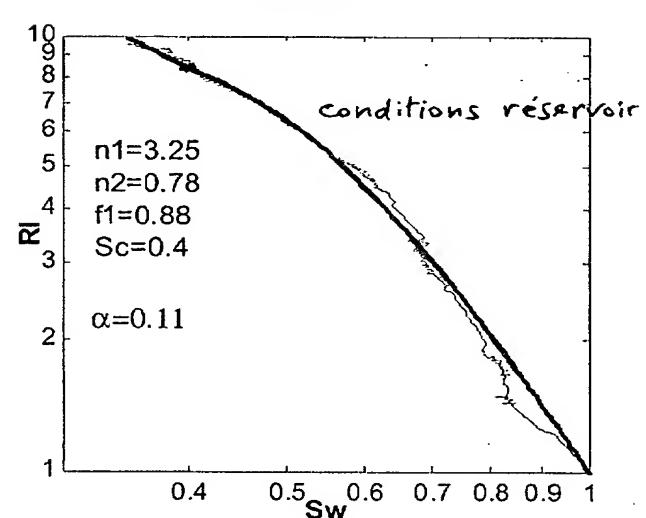


FIG.4B



3/4

FIG.5

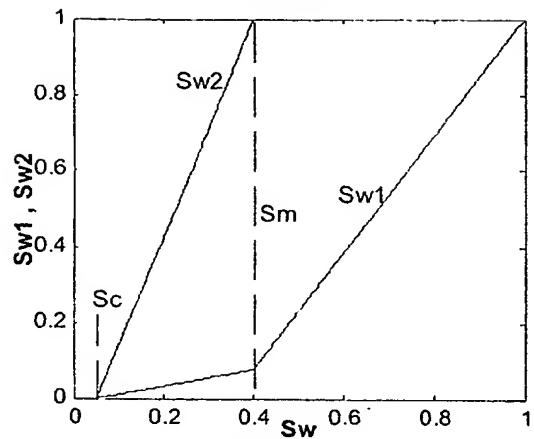


FIG.6

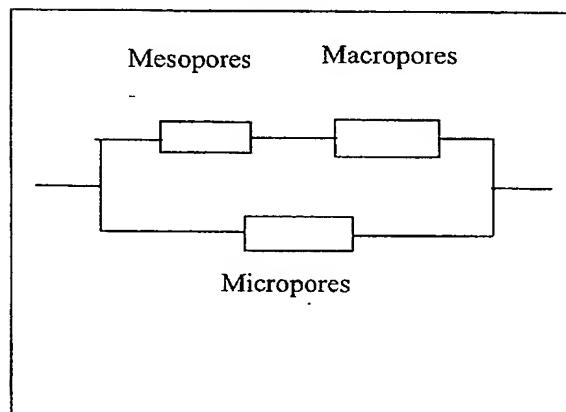
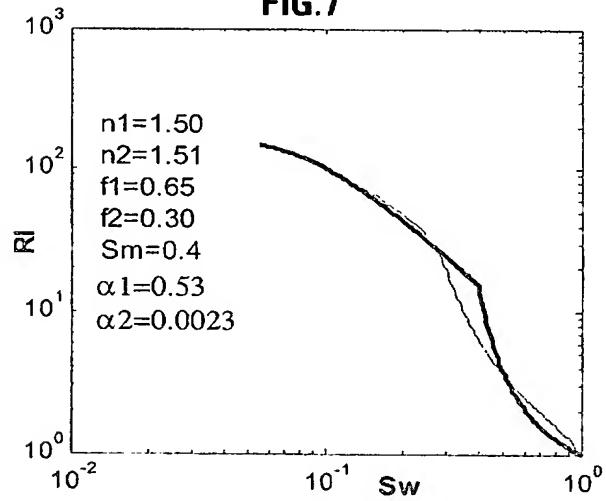


FIG.7



4/4

FIG.8

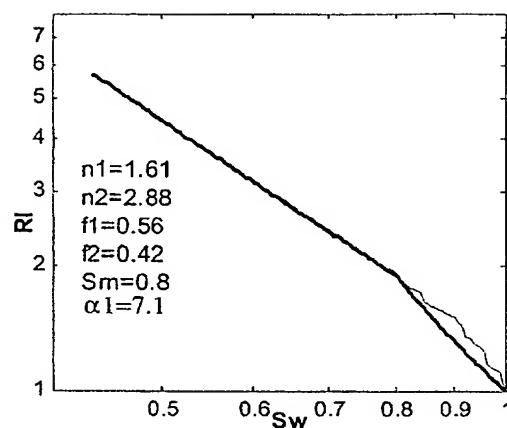
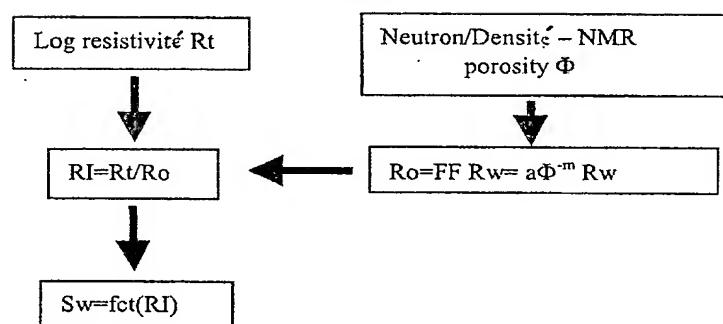


FIG.9



DÉPARTEMENT DES BREVETS

26 bis, rue de Saint Pétersbourg
75800 Paris Cedex 08
Téléphone : 33 (1) 53 04 53 04 Télécopie : 33 (1) 42 94 86 54

BREVET D'INVENTION

CERTIFICAT D'UTILITÉ

Code de la propriété intellectuelle - Livre VI

DÉSIGNATION D'INVENTEUR(S) Page N° 1.../1...

INV

(À fournir dans le cas où les demandeurs et les inventeurs ne sont pas les mêmes personnes)

Cet imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire

DB 113 GW / 270601

Vos références pour ce dossier (facultatif)	JC/CLN										
N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL	02111252										
TITRE DE L'INVENTION (200 caractères ou espaces maximum) METHODE POUR DETERMINER L'INDICE DE RESISTIVITE EN FONCTION DE LA SATURATION EN EAU, DE CERTAINES ROCHES DE POROSITE COMPLEXE											
LE(S) DEMANDEUR(S) : INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE											
DESIGNE(NT) EN TANT QU'INVENTEUR(S) :											
<table border="1"> <tr> <td>1 Nom</td> <td>FLEURY</td> </tr> <tr> <td>Prénoms</td> <td>Marc</td> </tr> <tr> <td>Adresse</td> <td>Rue 1 Les Geais Domaine St François d'Assise</td> </tr> <tr> <td>Code postal et ville</td> <td>78170 La Celle Saint Cloud</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Société d'appartenance (facultatif)</td> </tr> </table>		1 Nom	FLEURY	Prénoms	Marc	Adresse	Rue 1 Les Geais Domaine St François d'Assise	Code postal et ville	78170 La Celle Saint Cloud	Société d'appartenance (facultatif)	
1 Nom	FLEURY										
Prénoms	Marc										
Adresse	Rue 1 Les Geais Domaine St François d'Assise										
Code postal et ville	78170 La Celle Saint Cloud										
Société d'appartenance (facultatif)											
<table border="1"> <tr> <td>2 Nom</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Prénoms</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Adresse</td> <td>Rue</td> </tr> <tr> <td>Code postal et ville</td> <td>_____</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Société d'appartenance (facultatif)</td> </tr> </table>		2 Nom		Prénoms		Adresse	Rue	Code postal et ville	_____	Société d'appartenance (facultatif)	
2 Nom											
Prénoms											
Adresse	Rue										
Code postal et ville	_____										
Société d'appartenance (facultatif)											
<table border="1"> <tr> <td>3 Nom</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Prénoms</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Adresse</td> <td>Rue</td> </tr> <tr> <td>Code postal et ville</td> <td>_____</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Société d'appartenance (facultatif)</td> </tr> </table>		3 Nom		Prénoms		Adresse	Rue	Code postal et ville	_____	Société d'appartenance (facultatif)	
3 Nom											
Prénoms											
Adresse	Rue										
Code postal et ville	_____										
Société d'appartenance (facultatif)											
S'il y a plus de trois inventeurs, utilisez plusieurs formulaires. Indiquez en haut à droite le N° de la page suivi du nombre de pages.											
DATE ET SIGNATURE(S) DU (DES) DEMANDEUR(S) OU DU MANDATAIRE (Nom et qualité du signataire)											
Alfred ELMALEH, Chef du Département Brevets 											